

エタノール水溶液を用いた汎用ノズルバーナーの燃焼および噴霧特性に関する研究

著者	森 健憲
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-7
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022757

エタノール水溶液を用いた汎用ノズルバーナーの燃焼 および噴霧特性に関する研究

A STUDY OF COMMON TYPE NOZZLE BURNER COMBUSTION AND SPRAY CHARACTERISTICS
BY USING ETHANOL WATER SOLUTION

森健憲

Takenori MORI

指導教員 川上忠重

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

In recent years, ethanol has attracted attention as an environmentally substitute fuel because of exhaustion of petroleum resources and environmental issues. In this study, we investigated the exhaust gas temperature, emissions and particle size by using the ethanol water solution concentrations under continuous combustion region of a swirl burner. In addition, we examined the flame behavior and influence of flame shape and flame length on the exhaust gas temperature and reduction of emissions. Furthermore, the influence of the swirl flow by the supply air on the spray shape and the influence of the liquid film on the combustion characteristics were also examined. The exhaust gas temperature was measured in combustion chamber and exhaust pipe by using K type thermocouples. The main conclusion are as follows: 1) It is possible to control combustion by changing the ethanol addition rate, spray angle, spray pressure, and air ratio for ethanol water solution. 2) For low concentration of ethanol water solution, the particle size decreases with increasing the spray injection pressure.

Key Words: Ethanol, Ethanol water solution, Combustion temperature, Exhaust gas, Spray angle

1. 緒言

近年、石油資源枯渇化や環境問題が懸念されている中、環境に優しい代替燃料としてエタノールが着目されている。特に植物由来のバイオマスエタノールは燃焼時に排出される CO_2 がカーボンニュートラルと考えられ、輸送機器用燃料等、エタノールは工業用燃料としての利用拡大が期待されている。そのため、化石燃料にエタノールを混合した燃料を内燃機関に用いた研究は数多く行われている[1]。しかし、バイオエタノールは製造コストが高く利益が見込めないこと、化石燃料と比較して価格に対する発熱量の割合が小さいことが欠点として挙げられる。コーンを原料としてエタノールを製造した場合、原料の持つ総エネルギーに対して蒸留工程で 23 %、脱水工程で 14 %のエネルギーを必要とする[2]。そこで、エタノールと水を混合したエタノール水溶液を直接用いることで、精製で多大なエネルギーを要する脱水工程や蒸留工程を省くことにより、製

造コストの削減が見込まれる。エタノール水溶液の利用は無水エタノールと比較して価格に対する発熱量の割合を増加できる。また、現行の消防法ではエタノール濃度が 60 wt.%未満のエタノール水溶液は危険物の対象外となり、取り扱いが容易な燃料とされる。エタノール水溶液の内燃機関での利用は検討されており、エタノール水溶液を SI エンジンや HCCI エンジンに適用した研究も行われている。

エタノール水溶液を直接燃料として用いる場合、その着火性、排気温度、排気特性等に関する燃焼特性や水分割合の増加がそれらに及ぼす影響についての詳細な検討は必要不可欠である。石川らによる研究で、エタノール水溶液を汎用スワールバーナーによって噴霧燃焼させた場合、高含水割合の濃度においても、広い範囲の空気比で連続燃焼が可能であることが確認されている。併せて、燃料流量を一定 (4.3 L/h) とした実験においても、燃料濃度によらず低 NO_x の実現が可能である知見が得られている[3]。

そこで本研究では、次の段階として連続燃焼が可能な濃度である 45～95 vol.%のエタノール水溶液の内、主に 45 vol.%と 60 vol.%のエタノール水溶液を、スワールバーナによって噴霧燃焼させた場合、燃料中の水分割合が排気温度や排気成分に与える影響について検討を行った。併せて、石英ガラス管を用いて火炎挙動の可視化を行い、火炎形状の燃焼生成物低減効果に及ぼす影響について考察を行った。さらに、噴霧形状、燃料液膜挙動に関する検討を行った。

2. 実験装置

本研究では、汎用スワールバーナを用い、エタノール濃度の異なるエタノール水溶液を燃料として実験を行った。実験装置の概略を図 1 に示す。燃焼筒として内径 96 mm、長さ 110 mm のステンレス外筒を、燃焼室として内径 204.7 mm のステンレス製外筒を設置している。火炎可視化実験時には内径 120 mm、長さ 400 mm の石英ガラス管をスワールバーナ後方に設置し実施した。なお、排気ガス成分測定時には熱損失を可能な限り小さくするために燃焼室外周をシリカテープの断熱材で覆っており、実験を行った。燃料の供給方法としては圧力式スワールノズルを用い、噴霧角による影響を検討する実験においては噴霧角 45°、60°、80° の 3 種類のノズルを用いて実施した。いずれのノズルも流量範囲は 1.35 GPH である。また、ノズル後方には火炎の安定性を向上させるため、スワラを設置している。本実験で使用したスワラは外径 70 mm で中央部は直径 24 mm で開放された形状となっている。スワラの羽根角度は 35° であり、スワール数は 0.52 である。点火方法としては、火花点火で行い、燃焼用空気は送風機を用いて燃焼室に導入し、供給空気流量及びエタノール流量から空気比を設定した。排気成分は、水分割合による影響を検討した実験においては Dicom4000 を用い、エタノール濃度 45 vol.%、60 vol.%における噴霧角や空気比の詳細実験時には Auto5.1（リエロジャパン）を用いて排気ガス成分(主に CO)を計測した。

噴霧液滴の管内での挙動を把握するため、管内の流速を、スワラを設置した状態とスワラを設置していない状態両方で測定した。内径 126 mm のアクリル管に火炎可視化実験で用いたガラス管と同じ位置に穴を開け、流速測定器により測定した。測定器には KANOMAX 社製 Anemomaster 6035 を使用した。

噴霧液滴が火炎の挙動に及ぼす影響を調べるため、噴霧粒径の測定を行った。使用した計測装置に日機装社製 LDSA-1500A を使用した。使用したノズルは Hago 社製噴霧角 45°、60°、80° の 3 種類を用いた。いずれも 1.35 GPH である。

3. 実験方法

3.1 排気温度測定、排気成分測定

排気温度の測定では直径 204.7 mm の鋼管をバーナの後方に接続、熱電対を取り付け測定した。燃料流量と設定空気比から空気流量を決定した。排気温度は K 型熱電対を用いて、図 2 に示す 5 箇所の測定点を設けて測定した。

排気温度の測定では直径 204.7 mm の鋼管をバーナの後方に接続、熱電対を取り付け測定した。排気成分は熱電対より下流側で測定を行った。

エタノール水溶液の濃度は、連続燃焼可能な濃度である E45、E60 の燃料を用いた。本実験においてエタノールの体積割合が 45%の水溶液を E45 と表記する。

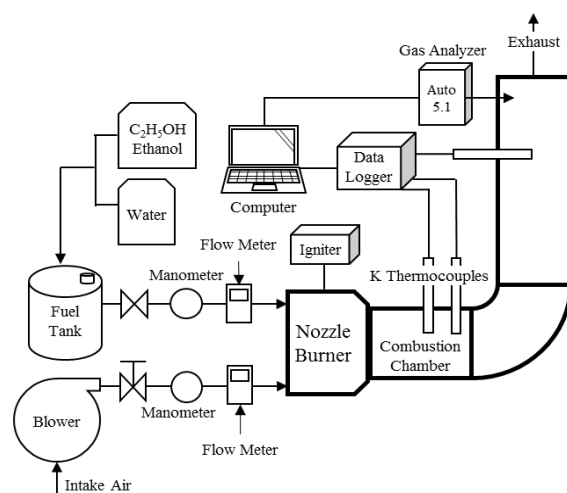


Fig. 1 Block diagram of experimental system

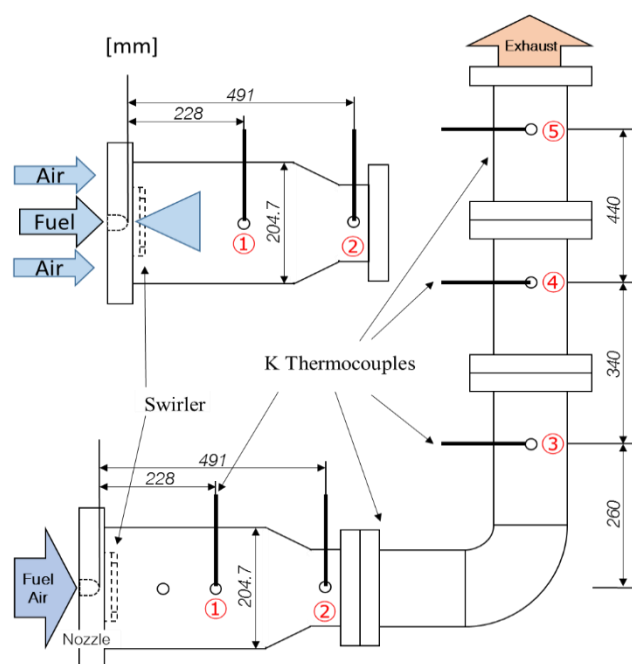


Fig. 2 Exhaust as temperature measuring point in combustion chamber

$\lambda=1$ と 2 で排気成分などの燃焼特性が大きく異なることから、空気比 $\lambda=1$ と $\lambda=2$ の間は $\lambda=1.2, 1.4, 1.6, 1.8$ と空気比を 0.2 刻みで設定した。

3.2 火炎可視化実験

燃焼室内の火炎挙動を観察するため、火炎可視化実験を行った。図 1 に示す実験装置でバーナ後方にガラス管を設置、ビデオカメラを用いて撮影した。

3.3 管内流速測定

噴霧液滴の管内での挙動を把握するため、管内の流速を、スワローを設置した状態とスワローを設置していない状態両方で測定した。図 3 に測定点の概略を示す。円筒管軸方向の流速と半径方向の流速をそれぞれの測定点において測定した。

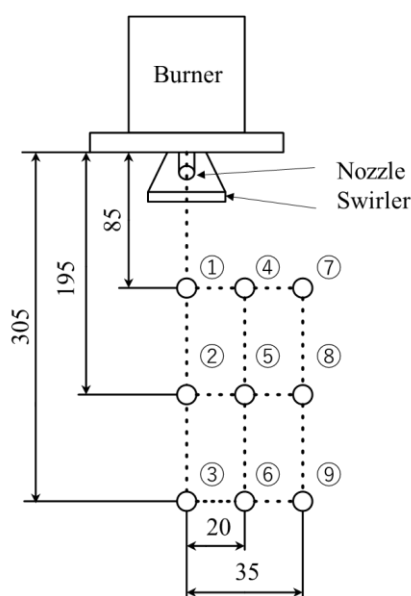


Fig. 3 Measurement point

3.4 噴霧液滴粒径測定

噴霧燃焼による火炎の形状と噴霧粒径の比較検討をするため噴霧液滴の粒径を測定した。測定点は図 3 に示す、管内流速測定と同じ位置で測定した。なお、使用したノズルは Hago 社製噴霧角 45° 、 60° 、 80° の 3 種類である。噴霧圧力は 0.1 から 0.5 MPa まで 0.2 MPa 刻みに設定した。

4. 実験結果

4.1 排気温度測定

図 4, 5 に、先のエタノール添加率の安定燃焼に関する検討を行うため、E45 及び E60 のノズルからの距離に対する排気温度をそれぞれ示す。これらの図から明らかなように、ノズル近傍での排気温度は、E45 及び E60 とともに、どの空気比においても 800°C 程度の排気温度が観察されており、ノズル直後では比較的安定した火炎が形成されていると思われる。著者らの先行研究においても、ノズル近傍では火炎の発生がすでに確認されており、本研究結果と一致

している。ここで E45 に着目すると、測定点③～⑤においては、どの空気比においても、ほぼ排気温度は 500°C 以下となっており、火炎形状による排気温度への影響は極めて少なく、同一空気比において $\lambda=2.0$ 以上ではほぼ一定となっている。一方、E60 では、後流側においても 600°C の排気温度が維持されている空気比が存在し、先の E45 と比較して、火炎長の増大が示唆される。

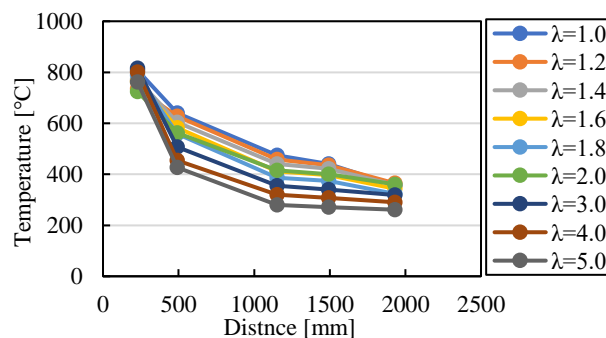


Fig. 4 Exhaust gas temperature (E45)

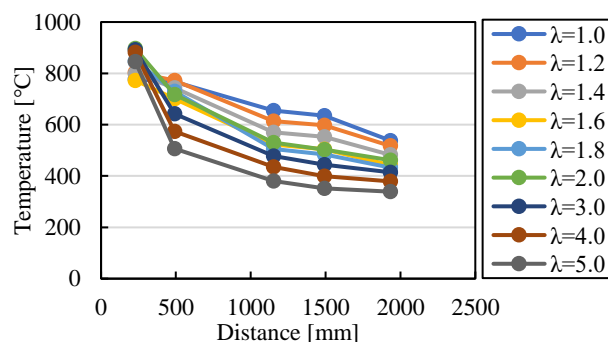


Fig. 5 Exhaust gas temperature (E60)

4.2 排気成分測定

図 6, 7 に、各エタノール添加率における CO 濃度の測定結果を、それぞれ示す。

E45 において空気比 λ が 1.2 より大きい条件では、 CO は燃料流量が一部空気比を除いて、 3.0 L/h で排出量が最も低く、また $\lambda=1.0$ では燃料流量が 3.5 L/h で CO の排出量が最小値となっている。これより E45 のエタノール水溶液において、同一空気比条件では、 CO の低減に関して最適な燃料流量条件が存在するものと考えられる。同一燃料流量下では、若干の変動は観察されるが、空気比 λ の値の増大に伴って CO 濃度は減少している。これは、供給される空気の量が多いほど燃料と空気の混合が促進されたものと考えられる。また $\lambda=1$ のみ他の空気比と比べて CO 濃度が高い値を示している。これは当然、ノズル後方のスワローによる乱れの影響に起因していると考えられるが今後の検討課題の一つである。

一方、E60 において空気比 λ が 1.4 以下の条件では燃料流量の増大に伴って CO は低減している。これは、供給される燃料と空気流量の増大に伴って混合がより促進され

たためと考えられる。また、空気比 λ が1.6以上の条件では燃料流量を変化させてもCO濃度に大きな差異は本実験範囲内では観察されなかった。これは、E60はE45と比較して、エタノールの添加割合が増大しており、それにより、高空気比領域においても比較的安定した燃焼が実現されているものと考えられる。すなわち、E60程度のエタノール水溶液を用いた場合には、燃料流量の制御により、広範囲な空気比($\lambda=1\sim5$ 程度)の実機レベルで実用化の可能性が示唆される。

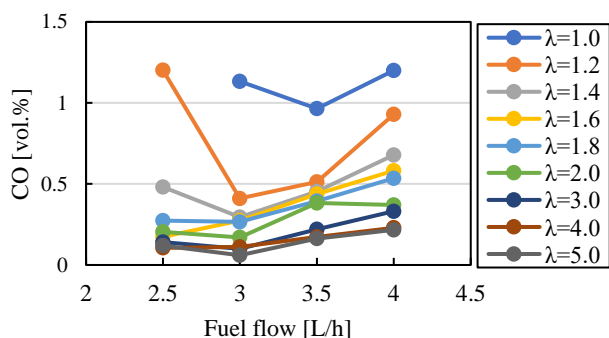


Fig. 6 Emission of CO (E45)

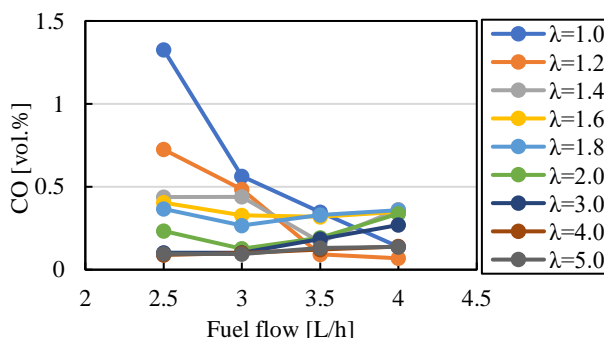


Fig. 7 Emission of CO (E60)

4.3 火炎可視化実験

表1に撮影した火炎の画像の代表例を示す。E60では全ての燃料流量、空気比、ノズル噴霧角条件で燃焼が確認されたが、E45では一部の条件で燃焼が確認されず失火した。火炎長は、エタノール添加濃度の低下、空気比の増大、また燃料流量4.0 L/hでの条件においてはノズル噴霧角の増大に伴って短縮することが確認された。すなわち、本研究範囲内では、エタノール水溶液を用いた場合においても、噴霧角、空気比、及びエタノール添加濃度による燃焼制御が可能であることが示唆される。E60において噴霧角45°と80°の条件において輝炎が観察された。このことから、火炎発光色と温度、排気成分との関係の検討が必要である。さらに工業的観点から低エタノール水溶液濃度(45vol.%以下)での検討も必要である。

4.4 管内流速測定

図8に図3における測定点①-④-⑦、②-⑤-⑧、③-⑥-⑨における軸方向の流速を上段から順にそれぞれ示す。本実

Table. 1 Burner flame

		Ethanol 45vol.% (E45)		
		Spray angle 45°	Spray angle 60°	Spray angle 80°
Fuel flow 3.0 L/h	$\lambda=1$	Miss fire		
	$\lambda=2$			
	$\lambda=3$			
Fuel flow 4.0 L/h	$\lambda=1$			
	$\lambda=2$			
	$\lambda=3$			
		Ethanol 60vol.% (E60)		
		Spray angle 45°	Spray angle 60°	Spray angle 80°
Fuel flow 3.0 L/h	$\lambda=1$			
	$\lambda=2$			
	$\lambda=3$			
Fuel flow 4.0 L/h	$\lambda=1$			
	$\lambda=2$			
	$\lambda=3$			

験ではE45を燃料とし、燃料流量を3.0 L/hとした場合の各空気比条件で空気のみを流したときの結果である。スワローに最も近い測定点①-④-⑦ではどの空気比条件でも管壁での流速が最も大きい、これは、スワローによる旋回流発生による速度増大が表れているものと考えられる。一方、スワローから最も遠い測定点③-⑥-⑨では管中心軸と管壁での流速に大きな差異が観察されない空気比条件が存在し、スワローによる旋回流の影響は減少していることが分かる。

図9に図3における測定点①-④-⑦、②-⑤-⑧、③-⑥-⑨における半径方向の流速をそれぞれ示す。スワローに近い①-④-⑦では空気比 λ が1~3では最大流速が管壁付近での測定点以外であり、また、 $\lambda=4\sim5$ では、管壁での測定点で最大流速となっている。このことから空気比が小さい、すなわち供給空気量が少ないと旋回流は大きく発生しないことが分かる。一方、スワローから最も遠い測定点③-⑥-⑨ではどの空気比条件でも管壁での流速が最大となっている。これより本実験では、旋回流はスワローから離れ下流になるほど増加することが分かる。

4.5 噴霧粒径測定

4.5.1 平均粒径測定

測定点①-②-③(噴霧中心軸上)にて測定した噴霧液滴の平均粒径(SMD)のグラフを図10, 11にそれぞれ示す。E45, E60どちらの燃料でも噴射圧力の増大に伴い、平均粒径が減少しているのが分かる。また0.3 MPaと0.5 MPaの条件では濃度による粒径の差はほとんど観察されなかった。

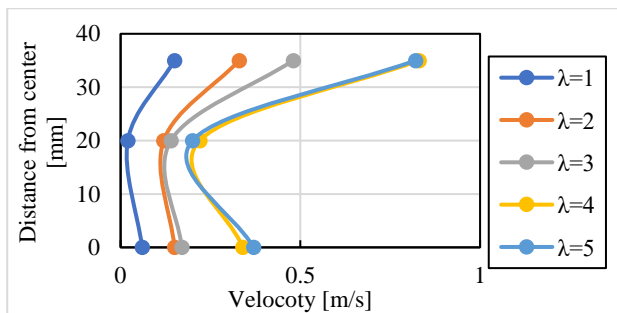


Fig. 8-1 Velocity of axial direction measurement
at ①-④-⑦

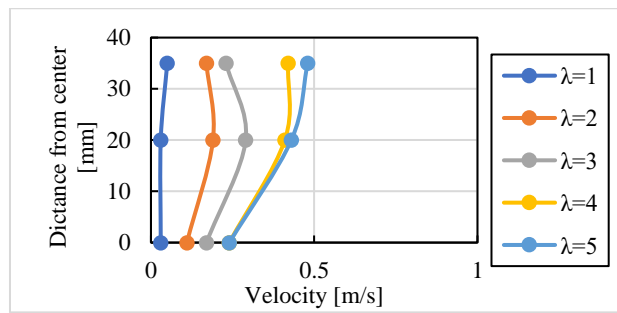


Fig. 9-1 Velocity of axial direction measurement
at ①-④-⑦

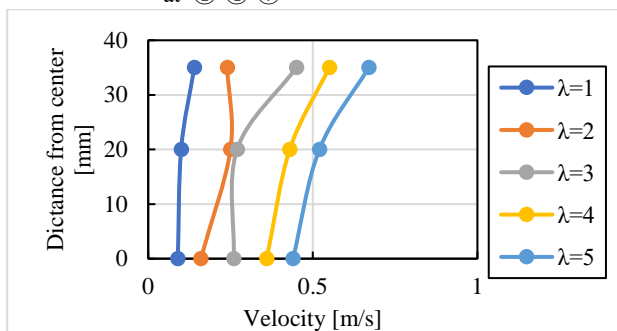


Fig. 8-2 Velocity of axial direction measurement
at ②-⑤-⑧

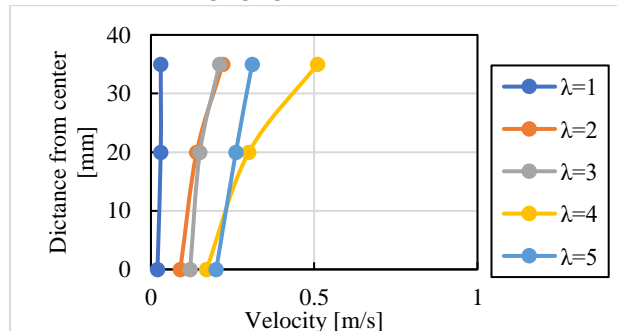


Fig. 9-2 Velocity of axial direction measurement
at ②-⑤-⑧

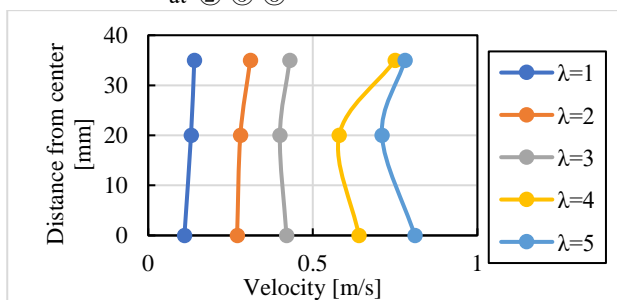


Fig. 8-3 Velocity of axial direction measurement
at ③-⑥-⑨

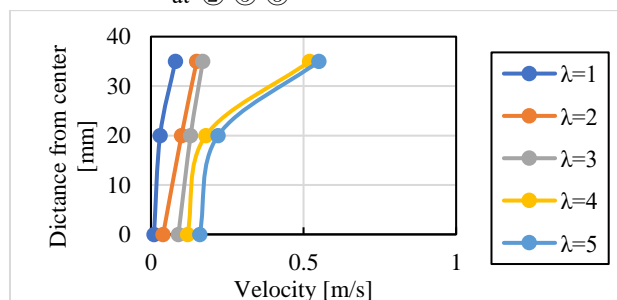


Fig. 9-3 Velocity of radial direction measurement
at ③-⑥-⑨

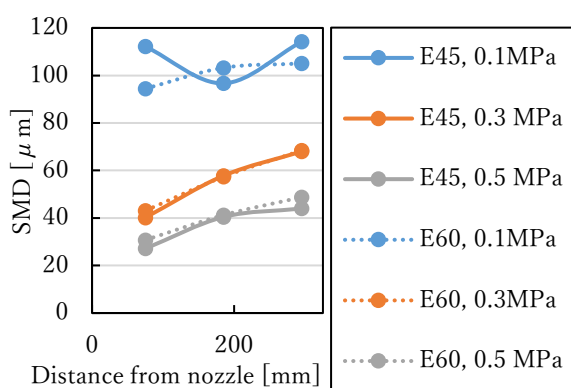


Fig.10 SMD E45, E60

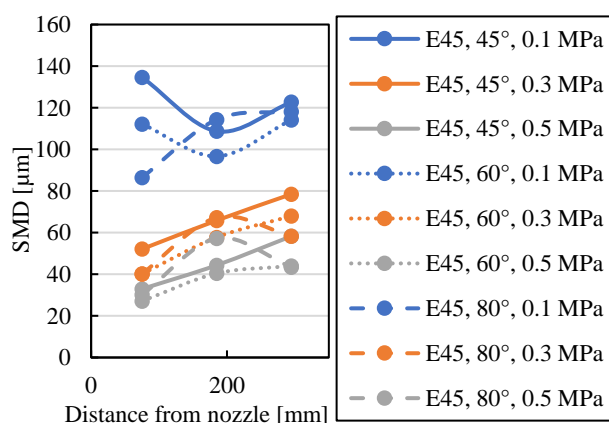


Fig.11 SMD spray angle 45°, 60°, 80°

ここで先の排気温度の結果から、空気比が同一条件の場合、E60の方がE45より最大で100℃程度増大しているが、これはエタノール添加率の差異による粒径の変化よりも、添加率による燃焼温度に起因しているものと考えられる。またノズルの噴霧角を変化させた場合、0.1 MPaにおいては、平均粒径がエタノール濃度やノズルの噴霧角、ノズルから

の距離に関わらず 80 μm 以上であるが、他の噴射圧力条件では 50 μm 以下の微粒化促進効果も観察された。すなわち、エタノール水溶液を用いた場合においても十分、噴霧角及び噴射圧力による燃焼制御の可能性が示唆される。今後、より詳細な噴霧液滴の平均粒径の燃焼生成物に及ぼす影響についても検討を行う必要がある。

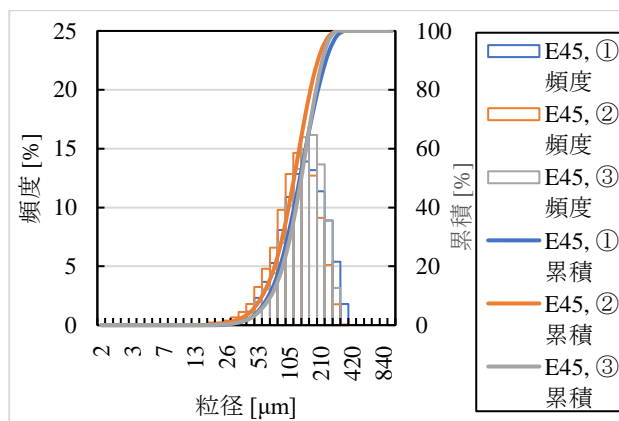


Fig. 12 Particle size distribution at E45, 0.1 MPa

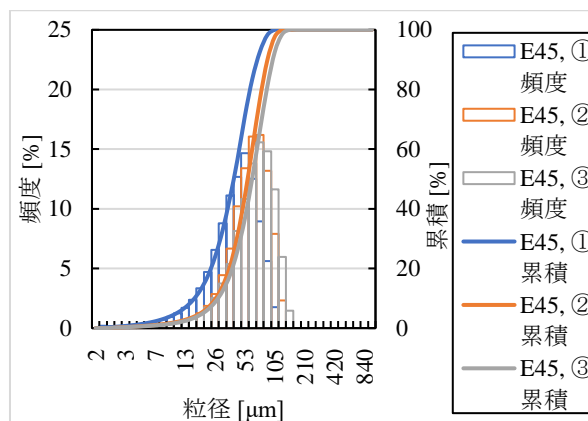


Fig. 13 Particle size distribution at E45, 0.5 MPa

4.5.2 粒径分布

図 12, 13 に E45 での圧力条件が 0.1 MPa と 0.5 MPa での粒径分布をそれぞれ示す。

0.1 MPa では全ての測定点において粒径の発生頻度が 105~210 μm の間でピークを迎えており、その頻度は約 15%である。一方、0.5 MPa では全ての測定点において発生頻度がおよそ 53 μm 付近に集中しており、先ほどの 0.1 MPa の条件と比較して粒径が小さい方へ分布が偏っている。また、0.1 MPa では 13 μm 以下の大きさの粒径は観察されなかったが 0.5 MPa では確認された。このことから噴射圧力を上昇させると微粒化が促進されていることが分かる。また 0.1 MPa では、測定点の違いによる粒径分布の違いはほとんど確認できないが、0.5 MPa では測定点①における 6.5 μm ~53 μm のサイズの粒径の発生頻度が他の測定点と比較して最大で 5%程度高い。このことから噴射圧力が 0.1 MPa では一度形成された液滴は蒸発等の影響をあまり受けない状態で下流へ流れるが、噴射圧力 0.5 MPa では微粒化が促進され、蒸発などの影響を受けた結果、下流の測定点②, ③では大きい粒径が残ったものと考えられる。E45 に限らず、E60 でも同様の傾向が確認された。

図 14, 15 に噴射圧力 0.1 MPa, 0.5 MPa における、本実験での火炎の中心と思われる測定点②の粒径分布をそれぞれ示す。0.1 MPa において、E45, E60 どちらの濃度でも 125 μm の大きさの粒径が最も発生頻度が高くその割合はどちらの濃度でも約 14~15%である。一方、0.5 MPa ではどちらの濃度でも約 53 μm の大きさの粒径が最も発生頻度が高く、その割合は約 16%である。また、0.1 MPa では粒径が 22~297 μm の間に分布しているのに対し 0.5 MPa では粒径の分布範囲が、9~125 μm と 0.1 MPa より小さい方へ分布していることが分かる。これより、噴射圧力を高くすると微粒化が進み、形成される液滴径も減少することが分かる。

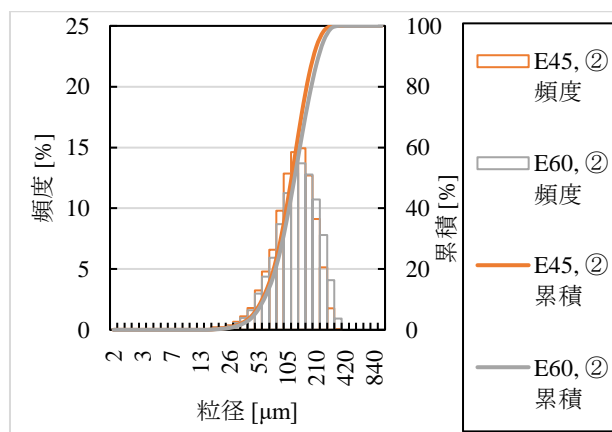


Fig. 14 Particle size distribution at ②, 0.1 MPa

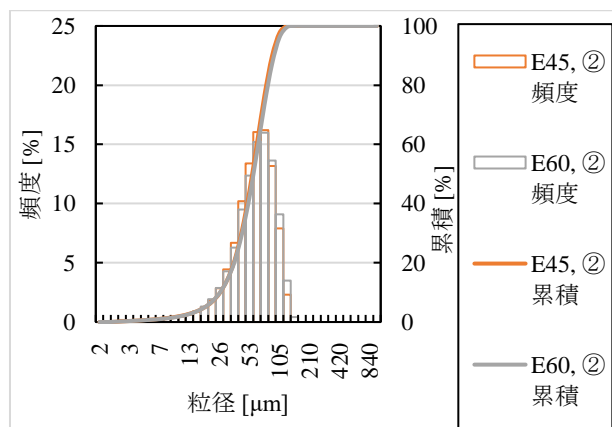


Fig. 15 Particle size distribution at ②, 0.5 MPa

次に噴射圧力を変化させた場合の粒径分布に着目する。図 16, 17 に本実験での火炎の中心と思われる測定点②での E45, E60 それぞれの粒径分布を示す。E45 に関しては、累積液滴量が 60%に達する時の粒径を比較すると、噴射圧力 0.1 MPa では約 125 μm であるのに対し、0.3 MPa と 0.5 MPa では約 53 μm と小さくなっていることが分かる。この傾向は E60 にも当てはまる。この噴射圧力と粒径の変化から 0.1 MPa から 0.3 MPa にかけては噴射圧力の増大と共に噴霧液滴の微粒化が大きく促進されるが、0.3 MPa から 0.5 MPa にかけては微粒化が大きくは促進されないことが分かる。

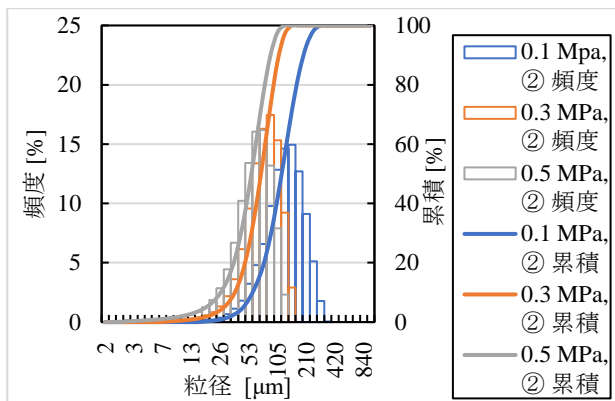


Fig. 16 Particle size distribution at E45, ②

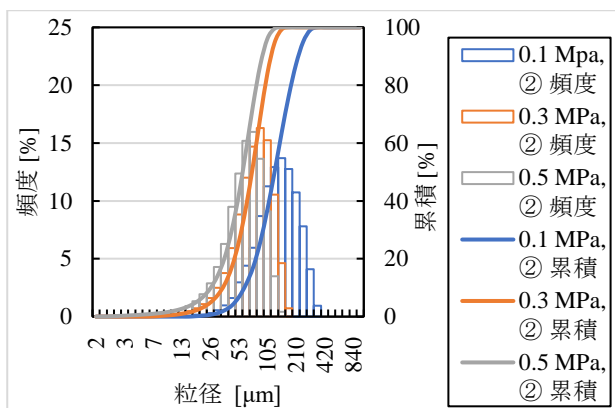


Fig. 17 Particle size distribution at E60, ②

4. 結言

本研究では、汎用スワールバーナを用いてエタノール水溶液を燃料とした場合の排気温度、排気成分、火炎形状、噴霧粒径についての検討を行った。以下に結論を示す。

- (1) エタノール水溶液を用いた場合、エタノールの添加率、使用ノズルの噴霧角、噴射圧力及び空気比による燃焼制御が可能である。
- (2) 低濃度エタノール水溶液を用いた場合には、噴射圧力の増大に伴って噴霧粒径は減少する。

参考文献

- 1) 中間二郎他：エタノール添加がガソリン予混合圧縮着火エンジンの着火特性に及ぼす影響，自動車技術会論文集，Vol.41，No.2，(March 2010)
- 2) ハリイプラジャ他：含水エタノール-軽油エマルジョン燃料によるディーゼル燃焼の改善，日本機械学会論文集B編，Vol.78，No.785，(2012)，pp.142-149
- 3) 石川陽関谷光，川上忠重，柳澤正成，前嶋晋，和田寛之，エタノール水溶液に関する一考察，日本機械学会年次大会，G0600104(2017)
- 4) 関谷ら 6 名，“エタノール水溶液を用いた燃焼特性に関する研究”，日本機械学会年次大会，G600403 (2018)